

근접병설터널의 보강 및 안정성 평가



이호성
(주)다산컨설팅
이사



구본수
(주)다산컨설팅
부사장



김정호
(주)다산컨설팅
부사장

1. 서론

최근 터널을 계획하면서 교량, 침매터널, 개착BOX 등의 구조물에 근접하거나, 도심지 터널의 경우 갱구부 용지매입 제한 등의 이유로 터널 병설이격 거리를 충분히 확보하지 못하여 전체 계획을 재검토 하거나 2-Arch터널을 적용하는 사례가 많이 발생한다.

이러한 경우 근접 병설터널로 계획한다면 오히려 보다 합리적인 결과를 도출할 수 있을 것이나, 국내뿐 아니라 해외에서도 사례가 많지 않아 설계기술자들이 개념적으로 접근하는 데 어려움이 있을 것으로 사료된다.

본고에서는 근접된 병설터널의 보강과 안정성 평가 방안에 대하여 최근의 사례를 중심으로 소개하고자 한다.

2. 터널의 병설 이격거리 기준

“터널설계기준”에 의하면 “터널의 단면 크기와 굴착대상 지반의 공학적 특성을 감안하여, 터널 굴착공사로 인

한 주변 지반거동 및 발파진동이 인접 터널에 나쁜 영향을 미치지 않도록 상호 충분히 이격시켜야 한다.”라고 언급되어 있다.

터널 상호간의 영향에 대해서는 지반이 완전탄성체일 경우에는 중심 간격이 굴착폭(D)의 2배, 지반이 연약지층인 경우 5배 이상으로 하면 거의 상호간에 영향을 미치지 않는 것으로 보고되어 있으며, 통상적으로 터널 중심간격을 2.5D로 적용하여 설계하는 적이 일반적이다.

표 1. 병설터널 이격거리 규정 및 적용예

터널설계기준	터널단면크기와 공학적 특성을 감안하여 상호 충분히 이격	
도로설계요령	일반적인 경우	굴착폭의 2~3배
	완전탄성체 경우	굴착폭의 2배
	연약지반일 경우	굴착폭의 5배
외국 적용 예	조립의 사질암반	굴착폭의 1.5배
	점착력있는 자갈층	굴착폭의 1.82배
	점토일 경우	굴착폭의 6배
한국도로공사	굴착폭의 1.5배(해석결과에 따라 경감)	

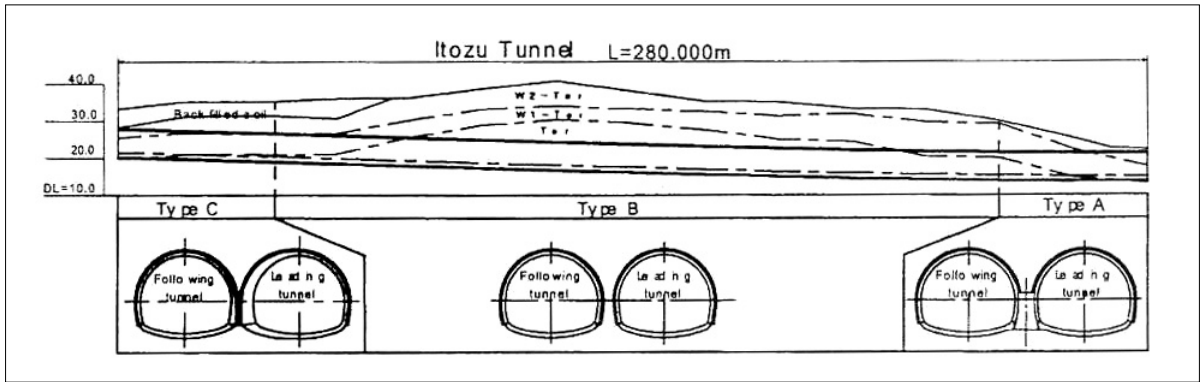


그림 1. 지반현황 및 터널단면 적용 현황

3. 근접 병설터널 외국사례

3.1 이토즈 터널

일본 후쿠오카현의 기타큐슈시에 건설된 280m 길이의 도시계획 제안으로 인해 두 터널간의 이격거리가 1m 정도내외인 이토즈터널의 개략적인 지반현황 및 적용된 터널단면은 그림 1과 같다.

기계굴착을 이용한 굴착공법과 short bench 공법으로 시공되었고, 토피고는 대략 20~30m 정도이며, 터널통과구간 상부에는 많은 지장물(빌딩, 주거지역, 학교, 사원 등)이 분포하고 있었다. 지층구성은 고생대 제3기의 강풍화된 사암 및 역암이 주를 이루며, 부분적으로 셰일 및 얇은 석탄층이 협재하고 있었다. 갱구부에는 풍화암이 발달하고 있으며 터널의 중앙부로 갈수록 풍화정도는 점점 감소하고 신선한 암반이 분포하고 있다.

3.2 오야마다이리(小山内裏)터널

동경도에 위치한 연장 389m의 오야마다이리(小山内裏)터널은 굴착단면적이 97.3~100.8㎡로 신생대 제4기 홍적세의 자갈질이 포함된 사질토층을 통과하고 있다. 도심지의 용지폭제한(30m)으로 인해 근접병설터널로 계

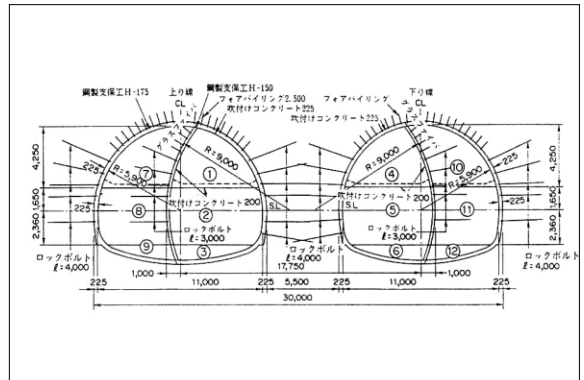


그림 2. 오야마다이리터널의 표준단면계획

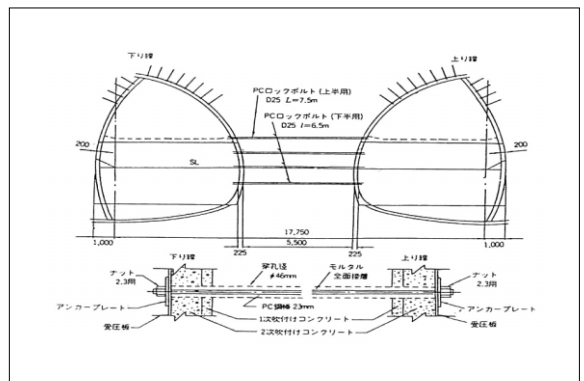


그림 3. 지반보강용 수평 PC 록볼트 계획

획되었으며, 토피고는 3~26m의 비교적 얇은 심도를 지나고 있었다.

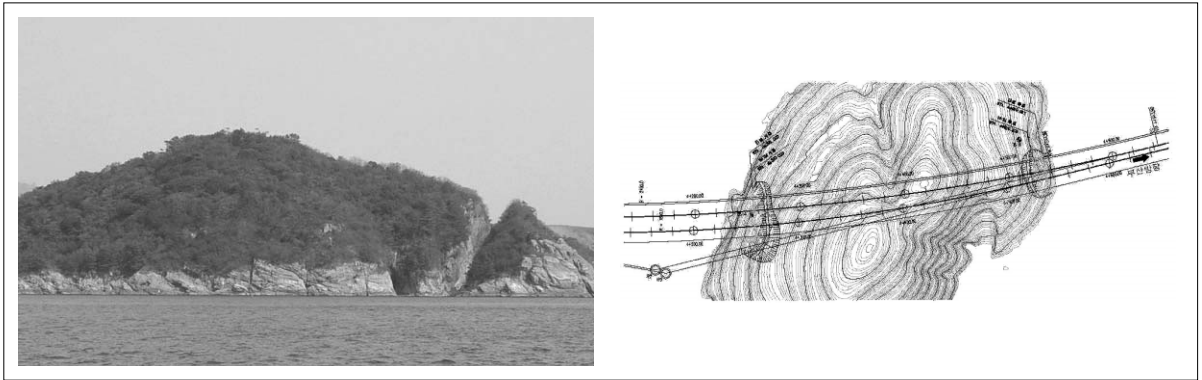


그림 4. 중속도 터널 현황

도시지역을 통과하는 2차로 도로터널의 특성상 터널계획 검토시 터널통과구간 직상부의 지장물의 영향을 고려하여 근접병설터널(그림 2)로 계획되었다. 터널사이의 지반에 대한 안정대책으로는 슛크리트 두께의 증가와 PC 록볼트를 이용한 보강을 수행하였다.(그림 3)

4. 근접 병설터널의 적정성

근접된 병설터널로 계획되어지는 경우에는 터널의 경제적인 측면보다는 병설터널의 구조적 안정성 확보가 중요시되어 지는데, 아직까지 국내에서는 근접병설터널에 대한 시공실적 및 설계사례가 부족하다.

또한, 대부분 콘크리트에 의한 기둥식 2-Arch 터널형식이 설계·시공되고 있어 암반 필라 형식의 근접터널은 국내뿐 아니라 해외에서도 설계·시공사례가 많지 않다.

그러나 몇 건의 사례조사 결과 근접병설터널의 계획에 있어서 무엇보다 중요한 것은 지반상태의 정확한 파악, 터널안정성의 확보를 위한 적절한 지보패턴 및 보조공법의 적용과 적절한 시공계획의 수립이라고 할 수 있다

근접병설터널은 중앙의 암반 필라의 지보능력을 이용하여 터널의 안정성을 유지하도록 계획되어 있으므로 이 토스트터널과 오야마다이리터널 등의 사례를 참고하여 암

반의 강성 및 지반조건, 지장물 여부 등을 종합적으로 검토하여 합리적인 시공방안을 선정하는 것이 타당하리라 판단된다.

특히, 중앙부 암반 필라부의 구조적 역할을 해석적으로 규명하여 지보기능을 검토할 필요성이 있는 것으로 판단된다. 특히, 암반 필라의 보강설계에 있어서는 예상되는 암반 파괴기준 및 지반이완에 대한 필라의 안정성 평가와 더불어 중앙 암반 필라의 손상에 대한 방지대책이 필요할 것으로 판단된다.

5. 비대칭 근접 병설터널의 설계사례

5.1 개요

설계 구간은 00-00간 연결도로 사업 구간 중 중속도 통과구간으로서 침매터널과 중속도 터널 접속구간으로 각각 방향별로 3차선터널과 2차선터널의 비대칭 형태의 병설터널이다.

중속도 터널 시점부는 해상교량과 연결되어 있고 종점부 이후는 침매터널이 계획되어 있으며, 터널 간 이격거리(pillar width)가 3.9m~10.4m인 근접 병설터널로 계획되었다.



그림 5. 응회질 퇴적암

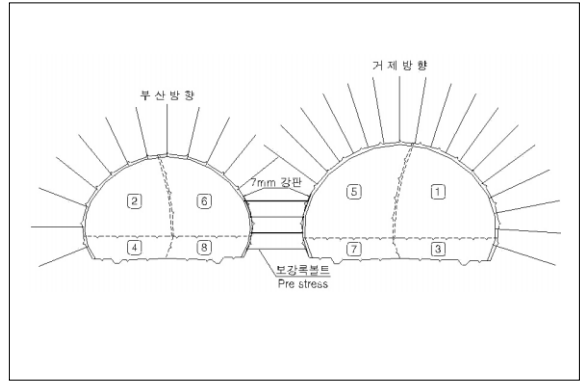


그림 6. 터널 굴착 및 지보 계획

5.2 지형 및 지질

기반암은 안산암질 화산복합체와 이를 관입한 산성 및 중성 암맥으로 구성되어 있으며 응회질 퇴적암이 주로 분포하며, 응회질 퇴적암은 세립질 사암과 이암의 호층으로 구성되어 있으며, 부분적으로 혼펠스화 되어 매우 치밀한 조직을 나타낸다.

5.3 설계 및 안정성 검토

설계에서는 유사한 해외의 시공사례에 대한 조사를 수행하여 예상되는 문제점 및 대책, 보조공법등에 대한 참고자료로 활용하고, 시공순서에 따른 근접터널의 역학적 거동 특성을 분석하여 설계적용 하였다.

응력집중이 예상되는 암반 필라부에 대한 안정성 검토를 위해 터널 굴착순서 및 이격거리(pillar width)에 따른 터널의 거동을 분석하여 근접병설터널의 상호 간섭효과에 대한 검토를 수행하였고, 암반 필라의 응력상태 및 터널변위를 종합적으로 검토하여 암반파괴이론에 근거한 안정성 평가를 수행하여 별도의 지반보강대책을 수립하였으며, 필라 안정성 평가를 위한 검토 항목들은 다음 표 2와 같다.

표 2. 필라 안정성 검토를 위한 해석의 경우

구분	해석 단면 경우
터널별 굴착순서에 따른 영향	· case 1 : 대단면 선굴착 · case 2 : 소단면 선굴착
이격거리에 따른 안정성 검토	· 병설터널간 이격거리별 해석 · 강도감소법 적용(0.25D, 0.5D, 0.75D, 1.0D, 1.5D, 2.0D)
Pre-stress에 따른 안정성 검토	· Rock bolt를 이용한 경우 · PC 강선을 이용한 경우(인장력:0.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 15.0, 20.0, 30.0tonf)
굴착순서에 따른 안정성 검토	· 중벽 및 상하반 굴착순서별 해석 · 필라부 rockbolt 인장력 5tonf 적용 (case 1, case 2, case 3, case 4)

5.3.1 터널별 굴착순서에 따른 영향

3차선과 2차선터널의 비대칭 병설터널의 단면 크기에 따른 굴착순서 검토결과는 양방향 모두 굴착한 후에는 변위 및 응력의 차이는 거의 동일하지만, 후행터널 굴착시 선행터널에 미치는 영향을 고려할 때 대단면 터널을 먼저 굴착하는 것이 전체적인 터널 안정성 유지에 유리한 것으로 판단되었다.

5.3.2 이격거리에 따른 안정성 검토

응력집중이 예상되는 암반 필라부에 대한 안정성 검토를 위해 이격거리(Pillar Width)에 따른 필라 안정성을

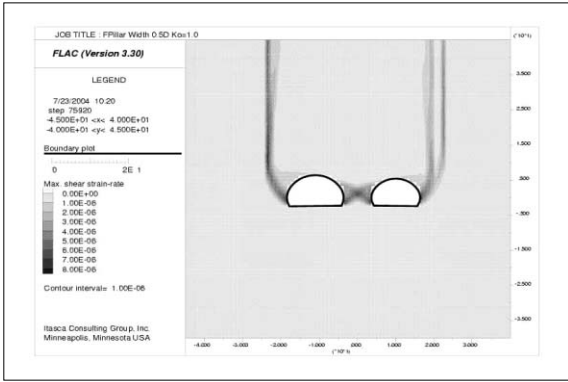


그림 7. 한계상태의 최대전단변형률

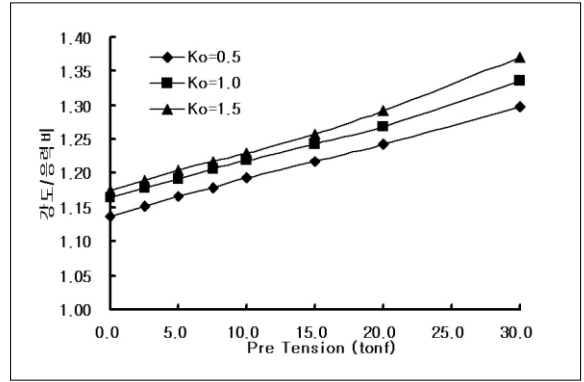


그림 9. Pre-tension에 따른 강도중량비

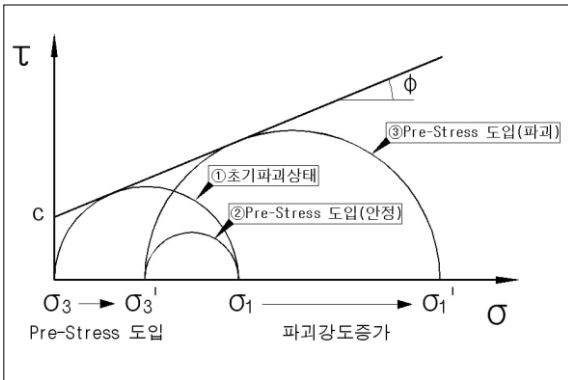


그림 8. Pre-Stress로 인한 응력상태변화

평가하였다. 또한 필라부의 안정성 뿐만 아니라 강도감소 방법을 이용하여 터널 전체의 안정성을 평가하고, 한계상태

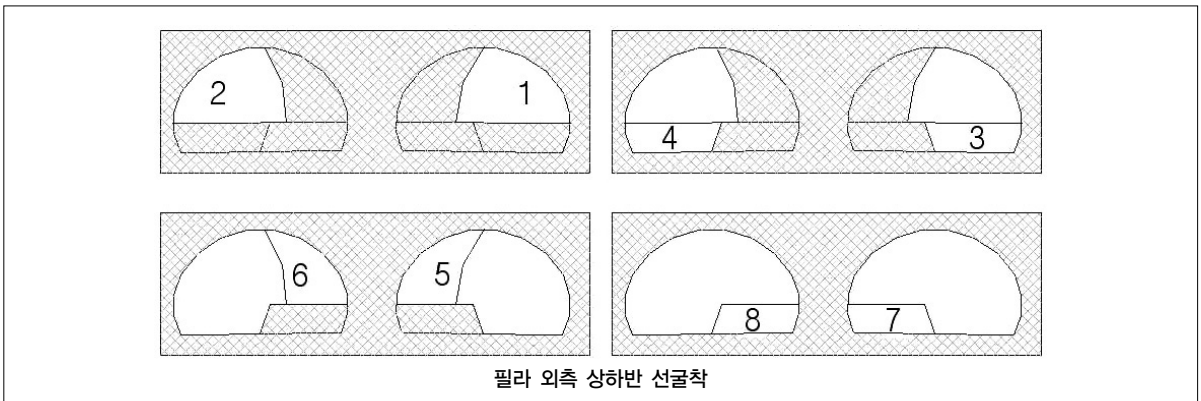
의 파괴형상을 예측하여 효율적인 지보설계를 검토할 수 있도록 하였다.

5.3.3 Pre-stress에 따른 안정성 검토

암반 필라의 안정성이 낮을 경우에 안정성을 확보하기 위하여 필라의 강도를 높이는 방법을 생각할 수 있다. 지반강도 정수의 증대효과를 기대하거나, 응력 상태를 변화시켜 암반 필라의 파괴강도를 높이는 방법 등이 있다.

일반적으로 지반강도 정수를 높이는 방안으로는 지반 보강 그라우팅을 생각할 수 있다. 하지만 암반에 적용할 경우에는 많은 어려움이 따른다.

지반보강 그라우팅은 현장에 적용하기 전에 시험시공



필라 외측 상하반 선굴착

그림 10. 분할 굴착순서 개요도

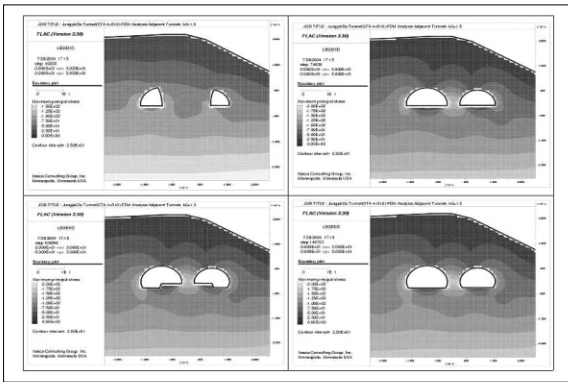


그림 11. 시공단계별 2차원 해석

을 실시하여 적정 주입재와 주입압 등을 산정하고 주입효과가 최대한 발휘될 수 있도록 하여야 한다.

Pre-Stress는 PC강선, 록볼트 등을 이용하여 쉽게 도입할 수 있으며 현장상황에 따라 조절하기가 용이하다. Pre-Stress의 크기에 따른 암반 필라의 강도/응력비 분석을 통하여 지반보강효과를 평가할 수 있다.

5.3.4 분할 굴착순서에 따른 안정성 검토

분할 굴착을 고려한 터널 굴착순서에 따른 암반필라부의 강도/응력비를 검토하여 합리적이고 안정적인 분할 굴착순서를 검토하였다.

5.3.5 2차원 해석에 의한 안정성 검토

근접 병설터널 구간인 중죽도 터널의 종점 갱구부는 편경사의 영향을 받으며 병설터널간 이격거리가 약 3.9m (0.27D)정도이며, 터널단면 크기가 다른 비대칭 터널로써 지보패턴 설계수준이 서로 상이하다. 그러므로 암반 필라의 안정성 검토사항을 토대로 지보설계 및 보강공법에 대한 적정성을 검토하였다.

5.3.6 3차원 해석에 의한 보조공법의 적정성 검토

중죽도 터널 종점 갱구부는 터널 이격거리(필라부)가 약 3.9m 정도로 매우 작고 갱구부 형성에 따른 3차원적

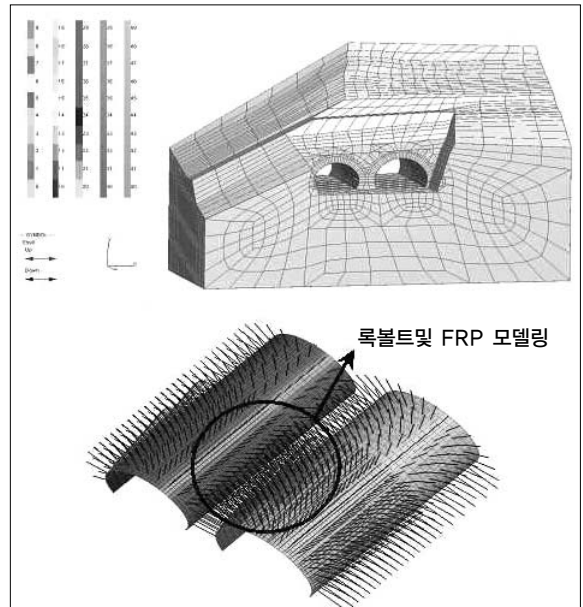


그림 12. 3차원 해석

동에 의해 횡방향 및 종방향 원지반 아치형성에 불리할 것으로 판단되어 천단부 보강공법으로 해수 침투에 의한 내부식력을 갖는 FRP 보강 그라우팅을 계획하였으며, 갱구부 시공과정을 단계별로 모델링함으로써 갱구부 지보패턴 및 보조공법의 적정성을 3차원유한요소해석에 의해 검토 하였으며, 터널부의 천단 및 내공변위 발생양상과 적용된 지보재들의 단면력 검토를 통하여 안정성을 검토하였다.

5.4 안정성 검토에 의한 굴착 및 지보방안

병설이격 거리 0.5D이하인 경우 강도/응력비가 낮아 암반 필라의 보강이 필요할 것으로 판단된다.

분할굴착 순서에 따른 검토 결과 암반 필라에서 먼 바깥쪽을 선굴착할 경우 상대적으로 안전한 경로를 유지하는 것으로 검토되었다.

암반 필라의 안정성을 위해 Pre-Stress를 도입하였을 경우 강도/응력비가 증가하는 것으로 검토되었으며,

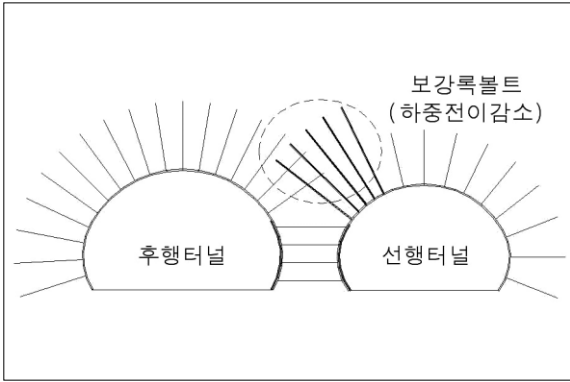


그림 13. 보강 록볼트 시공 개요도

FRP 보강효과가 천단침하, 수평변위 그리고 필라부 안정성에도 긍정적인 영향을 미치는 것으로 파악되었다.

근접터널의 경우 선행터널 굴착 후 후행터널 굴착시 터널상부 아칭효과 감소로 선행터널에 하중전이가 발생하여 추가 변위 및 지보재 응력이 발생하게 된다.

이러한 하중전이를 감소시키기 위해 후행터널 보다 선행터널의 지보수준을 증대시키거나 선행터널 굴착 후 암반 필라부에 보강 록볼트를 추가로 설치하는 방법을 고려할 수 있다.

터널의 굴착공법으로는 천공에 의한 발파공법이 일반적이거나 본 근접 병설터널은 분할 굴착 시 바깥쪽은 발파공법을 적용하고, 안쪽은 암반 필라의 보호를 위하여 유압식 암파쇄 공법을 적용하였다.

6. 결론

지금까지 병설터널 계획 시 방향별 터널간격이 충분히 확보되지 않으면, 1-Arch 대단면이나 혹은 콘크리트에 의한 기둥식 2-Arch 터널을 계획하였다.

하지만 1-Arch 대단면의 경우 굴착량과 보강비가 과다하여 비경제적이고 안정성도 불량하며, 콘크리트에 의한 기둥식 2-Arch 터널의 경우 중앙부 굴착 및 기둥 시

공시 시공성이 불량하여 비경제적이고, 중앙 기둥부에서의 배수구 유지관리가 어려움이 있었다. 그러므로 터널 계획시 이러한 단점에 대한 보완대책이 요구됨으로써 국내에서도 앞으로 암반 필라에 의한 근접 병설터널의 적용이 늘어갈 것으로 사료된다.

본 고에서 소개한 근접 병설터널은 아직은 국내사례가 적고 시공시 암반 필라부 보호와 보강에 대한 대책이 부족한 것은 사실이나 터널의 아칭효과를 이용하면서 기존의 암반을 기둥으로 활용함으로써 많은 문제점이 해결 가능할 것으로 판단되며, 향후 발전된 많은 대안들이 제시될 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 유광호, 박연준, 배규진 (2000), "연약 암반층에 굴착된 터널의 안전을 평가", 대한터널협회 논문집, Vol.2, No. 3. pp 47~57.
2. 한국터널공학회, 서초역-방배로간 도로개설공사 중 터널안정성 검토 연구(서리풀터널 안정성 검토연구), 연구보고서, 2002.
3. 김도형, 박준경, 김영근, 오세준, 이두화 (2003), "대단면 근접병설터널의 설계 및 안정성 평가기법에 관한 연구", 한국지반공학회, 봄 학술발표회 논문집, pp. 51~66.
4. 한국터널공학회, "부산-거제간 연결도로 중측도 통과구간 근접 터널보강공법 설계 검토 연구", 연구보고서, 2004.
5. Hoek, E. and Brown E.T. (1980), "Underground excavation in rock", Institution of Mining and Metallurgy.
6. Masakuni Kobayashi (1994), "Observational construction of a large sectional minimum interval twin road tunnel in urban alluvial loose sand soil", Tunnelling and Ground Conditions, Abdel Salam(ed.), Balkema, Rotterdam, pp.157~164.
7. M. Kamimura (2002), "Discussion on the behaviours of parallel tunnel with a small clearance", 28th ITA General Assembly and World Tunnel Congress, 2002, pp 898~906.
8. NATM補助工法選定マニュアル (1992), 研究報告書, 社団法人トンネル技術協會.